

## ESTUDIO DE PERFILES HÍDRICOS A PARTIR DEL MÉTODO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY)

Andrés Eduardo Torres Abello\*

**Resumen:** el método TDR (Time Domain Reflectometry) permite, a diferencia de los métodos clásicos, tener la evolución de la cantidad media de agua en los suelos. Sin embargo, esta técnica no permite mediciones de los perfiles de cantidad de agua utilizando una sola sonda. En este trabajo, realizado en el laboratorio *Unité de Recherche en Génie Civil (URGC) - Géotechnique del Institut National des Sciences Appliquées (INSA)* en Lyon, Francia, se hizo una investigación en la literatura existente para revisar los principios sobre los cuales se basa el método TDR. Esta investigación se realizó también con el fin de obtener métodos fiables y de fácil utilización que apuntaran a la resolución del problema (medición de perfiles de cantidad de agua por medio de una sola sonda TDR). Para la determinación de perfiles de humedad, utilizando una sonda TDR, se escogió el método simplificado desarrollado por Pereira dos Santos [1997]. Por otra parte, se utilizaron programas de computador para el tratamiento de las señales TDR; adicionalmente, se hicieron algunos ensayos de laboratorio para obtener bases que permitieran evaluar dichos métodos y programas. Se demuestra que aún se deben resolver algunos aspectos para llegar al dominio de la técnica TDR que permitan la determinación de perfiles hídricos.

**Abstract:** the TDR (Time Domain Reflectometry) method permits, unlike classic methods, to obtain the evolution of the average amount of water in the soils. Nevertheless, this technique does not permit measuring the profiles of the amount of water when using only one probe. In this work, carried out in the laboratory *Unité de Recherche en Génie Civil (URGC) - Géotechnique, of the Institut National des Sciences Appliquées (INSA)* of Lyon, France, we did some research into the existing literature to review the principles on which the TDR method is based. This research was also done to obtain reliable methods easy to use that

\* Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Master en Ingeniería Civil, INSA, Francia, Profesor Instructor, miembro del grupo de investigación hidrociencias, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

had the purpose of solving the problem (measuring quantity profiles of water through the use of only one probe). For the determination of humidity profiles by using a TDR probe, the simplified method developed by Pereira dos Santos [1997] was chosen. On the other hand, some computer programs for the processing of TDR signals were used: some laboratory tests were done in order to obtain the foundations for evaluating those methods and programs. It was demonstrated that many quite important problems should still be solved to arrive at the point of controlling the TDR technique for determining hydric profiles.

## 1. INTRODUCCIÓN

La medición de la humedad en los suelos es necesaria en disciplinas como la geotecnia, la agricultura, la hidrología o en aplicaciones industriales. Esta necesidad resulta de las condiciones necesarias para definir el tiempo óptimo de irrigación, la tasa de infiltración, el flujo del agua en el suelo, las tasas de transferencia de contaminantes y para evaluar el potencial de escape de un sitio o una barrera impermeable. Todas esas necesidades requieren el conocimiento de la evolución de la cantidad de agua en los suelos. Los métodos clásicos de determinación de la humedad de un suelo (métodos gravimétricos) no permiten obtener mediciones continuas; por lo tanto, no muestran su evolución.

Existen métodos de medida relativamente recientes que permiten la obtención de mediciones continuas de la cantidad de agua en los suelos, como el método capacitivo, el método nuclear, el método neutrónico o el método TDR (Time Domain Reflectometry). Esos métodos presentan muchas desventajas ligadas principalmente a la precisión y a la fiabilidad de las medidas. El método TDR se muestra como el método más eficaz y con el más amplio porvenir. Sin embargo, en la rama de las ciencias del suelo, este método ha sido utilizado para materiales porosos finos y para hacer mediciones muy localizadas. Por consiguiente, las sondas TDR que se encuentran en el mercado no están adaptadas para la obtención de perfiles de la cantidad de agua a lo largo de las líneas de transmisión de ondas. El objetivo del trabajo de investigación realizado es evaluar el método que hoy en día se muestra como el más fiable para la medición de perfiles hídricos en el suelo por medio de una sola sonda TDR.

## 2. TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA A PARTIR DEL MÉTODO TDR

El método TDR consistió en enviar al suelo una señal electromagnética a través de guías de ondas para posteriormente analizar la señal reflejada. El principio de la medición reposa sobre la explotación del contraste que existe entre la permitividad eléctrica del agua y la de los minerales. Cada material tiene una constante dieléctrica,  $K$ , que

varía de 1 a 80. El valor mínimo que puede tomar esta constante corresponde a la constante dieléctrica del aire y el valor máximo corresponde a la del agua. Para acceder a la permitividad eléctrica del medio, se mide la velocidad de propagación,  $v$ , de la impulsión provocada por un generador.

Según Dalton et al. [1984]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K^*}} \quad (1)$$

Donde:

$v$  = velocidad de propagación de la onda magnética en el medio.

$K^*$  = constante dieléctrica compleja.

$c$  = velocidad de la luz en el vacío ( $=3 \cdot 10^8$  m/s).

La constante dieléctrica que se puede medir es la «constante dieléctrica aparente»,  $K$ :

$$K = \frac{K' (1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})}{2} = \frac{K'}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{K'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0}}{K'} \right]^2} \right) \quad (2)$$

Donde:

$K'$  = parte real de la constante dieléctrica compleja.

$\tan \delta$  = tangente de pérdida dada por:

$$\tan \delta = \frac{K'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \epsilon_0}}{K'}$$

$K''$  = parte imaginaria de la constante dieléctrica compleja.

$\sigma_{dc}$  = conductividad eléctrica del medio a frecuencia nula.

$f$  = frecuencia de la onda electromagnética.

$\epsilon_0$  = constante dieléctrica en el vacío  $(36\pi \cdot 10^9)^{-1}$  F/m.

La constante dieléctrica del suelo está gobernada por su contenido en agua y se puede calcular por medio de la ecuación (3), deducible de la ecuación (1):

$$K = \left( \frac{c}{v} \right)^2 = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3)$$

Donde:

$t$  = tiempo de viaje de la pulsación para atravesar la línea de transmisión (ida y vuelta).

$L$  = longitud de las líneas de transmisión de ondas.

Para obtener la cantidad media de agua a partir de esta constante dieléctrica existen varios métodos. El método más utilizado es la relación empírica de Topp et al. [1980]:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^2 + 2.29 \cdot 10^{-2} \cdot K - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot K^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot K^3 \quad (4)$$

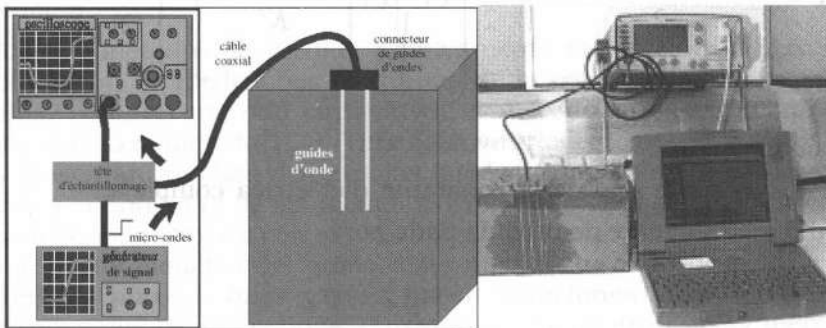
Donde:

$\theta$  = contenido en agua dado como una fracción del volumen total de la muestra.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo TDR consta de un osciloscopio numérico y un generador de impulsos negativos conectado por intermedio de un cable coaxial y de una cabeza de conexión a una línea de transmisión de longitud  $L$  (sonda) insertada en el suelo, como lo muestra la figura 1.

FIGURA 1. Sistema general TDR



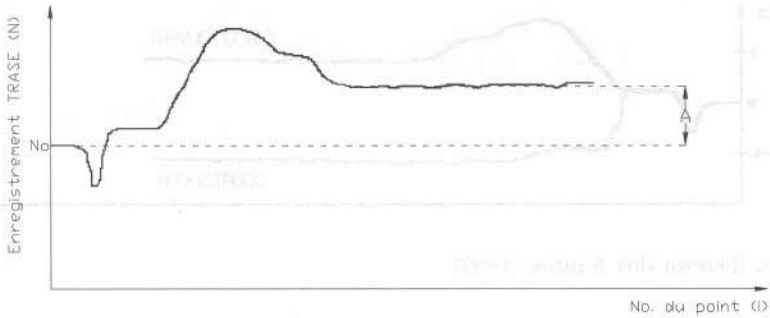
Fuente: [Todoroff, 1998].

El aparato de prueba se utiliza para enviar una onda a las líneas de transmisión. Luego, éste recibe una señal de vuelta afectada por la constante dieléctrica del suelo, la cual es una función de su humedad. El análisis de la onda reflejada da la información necesaria para calcular el contenido de agua en el suelo. Para el tratamiento de la señal TDR a fin de obtener el perfil de contenido de agua se utilizó el método presentado por Pereira dos Santos [1997], consistente en la realización de los siguientes pasos:

PASO 1: OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN,  $\rho(t)$ :

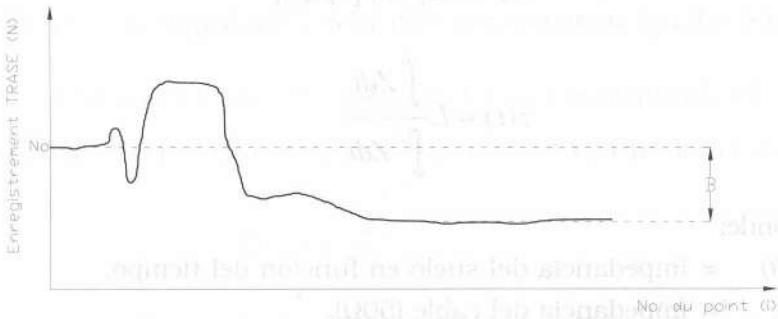
En las figuras 2 y 3 se muestran las curvas obtenidas en circuito abierto y en corto circuito, respectivamente.

FIGURA 2. Señal reflejada registrada por el aparato TDR para una sonda en circuito abierto.



Fuente: [Pereira dos Santos, 1997]

FIGURA 3. Señal reflejada registrada por el aparato TDR para una sonda en corto circuito.



Fuente: [Pereira dos Santos, 1997]

A partir de estas curvas se pueden aplicar las ecuaciones (5) y (6) para construir la curva de variación del coeficiente de reflexión (figura 4).

$$\rho(i) = 2 \cdot FE \frac{N(i) - N_0}{(A + B)} \quad (5)$$

$$t(i) = \frac{i \cdot Bdt}{NP} \quad (6)$$

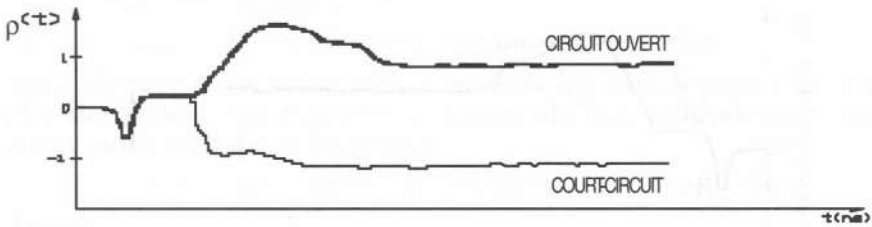
Donde :

FE = factor de escala; equivalente a 0.74 si la impedancia de la sonda en el suelo es inferior a  $40\Omega$ .

Bdt = base de tiempo (10, 20, 40ns...).

NP = número de puntos registrados por el aparato TDR.

FIGURA 4. Variación del coeficiente de reflexión  $\rho$ , en función del tiempo,  $t$ (ns).



Fuente: [Pereira dos Santos, 1997]

PASO 2: CÁLCULO DEL PERFIL DE IMPEDANCIA  $Z(z)$ .

Para ello se utilizan las ecuaciones (7) y (8)

$$Z(t) = Z_c \exp[2\rho(t)] \tag{7}$$

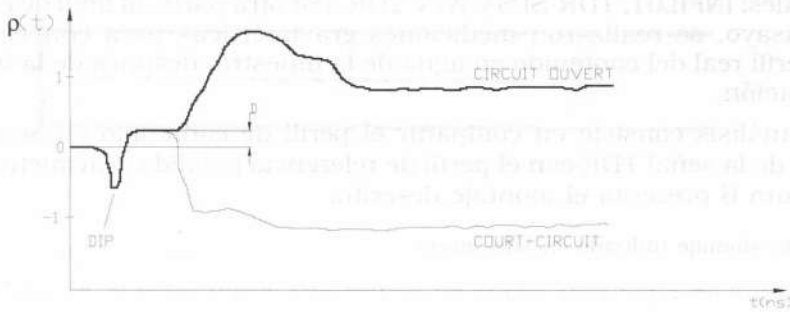
$$z(t) = L \frac{\int_{t_i}^t Z dt}{\int_{t_i}^{t_f} Z dt} \tag{8}$$

Donde:

- $Z(t)$  = impedancia del suelo en función del tiempo.
- $Z_c$  = impedancia del cable ( $50\Omega$ ).
- $z(t)$  = distancia en función del tiempo.
- $t_i$  y  $t_f$  = límites de la parte útil de la señal.

PASO 3: IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE LA SONDA,  $Z_a$ .

Se debe encontrar una distancia,  $D$ , sobre la curva  $\rho(t)$  en circuito abierto. Esa distancia se encuentra justo después del mínimo, *dip*, en la figura 5.

FIGURA 5. Distancia,  $D$ , para determinar la impedancia característica,  $Z_a$ 

Fuente: Pereira dos Santos, 1997

$Z_a$  se puede calcular a partir de la ecuación:

$$Z_a = Z_0 \frac{1 + D}{1 - D} \quad (9)$$

Donde  $Z_0$  es la impedancia del cable, generalmente igual a  $50\Omega$ .

#### PASO 4: PERFILES DE PERMITIVIDAD, $K(z)$ , Y DE CONTENIDO DE AGUA, $\theta_z$ .

El perfil de permitividad,  $K(z)$ , se puede calcular a partir de la relación:

$$K(z) = \left( \frac{Z_a}{Z(z)} \right)^2 \quad (10)$$

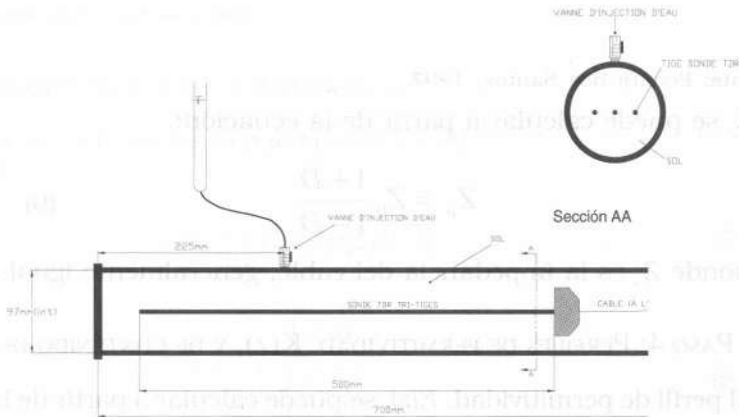
Se pueden utilizar con precaución enfoques empíricos presentados en varias investigaciones para establecer la relación entre la constante dieléctrica del suelo y su contenido de agua ( $\theta$ ), pero la relación más utilizada es la relación de Topp et al. [1980] de la ecuación (4). Para validar el método descrito anteriormente, fue necesario realizar ensayos en el laboratorio *URGC-Géotechnique* del INSA de Lyon, Francia. Los montajes comprenden dos partes: el modelo físico de un suelo saturado y la adquisición de los datos.

- Modelo físico de un suelo saturado: la muestra es puesta en un tubo PVC de 9.7 cm de diámetro interno. Este tubo tiene una válvula sobre su parte superior central para permitir una inyección de 300 mL de agua. Esta inyección se realizó progresivamente de 100mL en 100mL. El tubo se puso en posición horizontal. La muestra puede ser de un suelo a dos capas, a tres capas o de un suelo natural con una humedad natural del 6%; los tipos de suelos utilizados son arenas arcillosas y aluviones.
- Adquisición de datos: una sonda de tres líneas de transmisión de ondas fue introducida dentro de la muestra de suelo. Esta sonda está conectada a un aparato Tektronix 1502B, que envía un im-

pulso electromagnético y recibe una señal reflejada. Tres programas de computador fueron utilizados con el fin de adquirir las señales: INFIL01, TDR-SPS y WIN-TDR. Por otra parte, al final de cada ensayo, se realizaron mediciones gravimétricas para conocer el perfil real del contenido en agua de la muestra, después de la infiltración.

El análisis consiste en comparar el perfil de contenido en agua a partir de la señal TDR con el perfil de referencia (medida gravimétrica). La figura 6 presenta el montaje descrito.

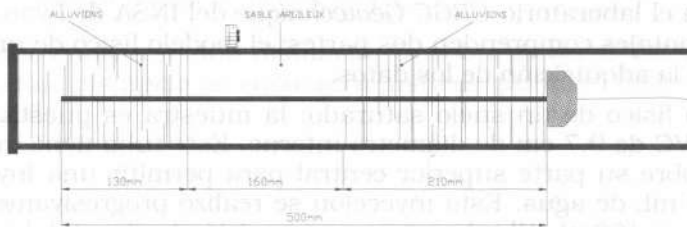
FIGURA 6. Montaje utilizado en laboratorio



Fuente: [Torres, 2000]

- a) Montaje 1: este montaje comprende tres capas de suelo: una capa de aluviones de 21 cm de espesor, una capa de arena arcillosa de 16 cm de espesor y una capa de aluviones de 13 cm de espesor, como se muestra en la figura 7.

FIGURA 7. Montaje 1 (suelo a tres capas).

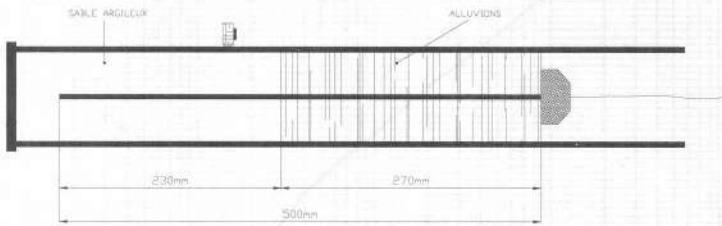


Fuente: [Torres, 2000]

- b) Montaje 2: para este montaje, se utilizó una muestra de suelo de dos capas; la primera es una capa de aluviones de 27 cm de espesor y la segunda es una capa de arena arcillosa de 23 cm de espesor (figura 8).



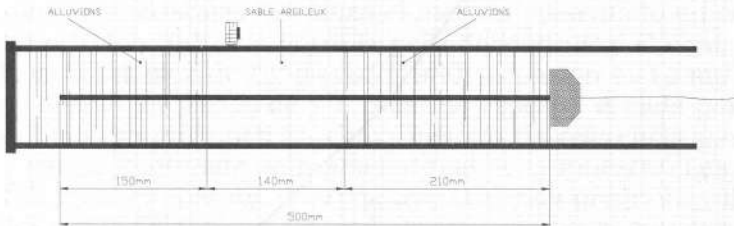
FIGURA 8. Montaje 2 (suelo a dos capas).



Fuente: [Torres, 2000]

- c) Montaje 3: comprende tres capas de suelo, una capa de aluviones de 21 cm de espesor, una capa de arena arcillosa de 14 cm de espesor y una capa aluviones de 15 cm de espesor (figura 9) .

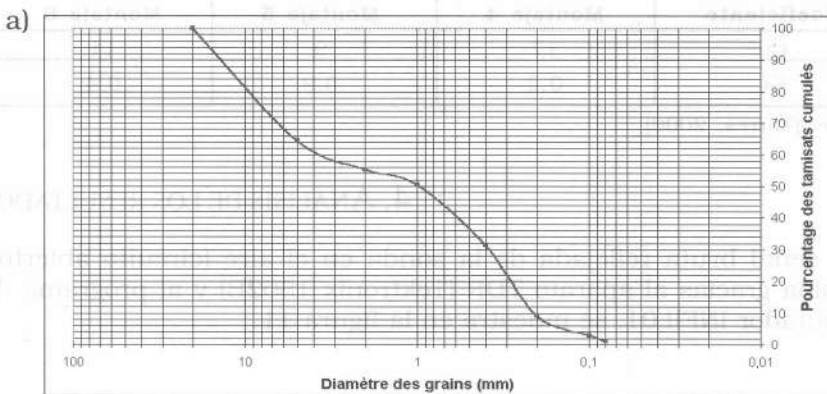
FIGURA 9. Montaje 3 (suelo a tres capas).



Fuente: [Torres, 2000]

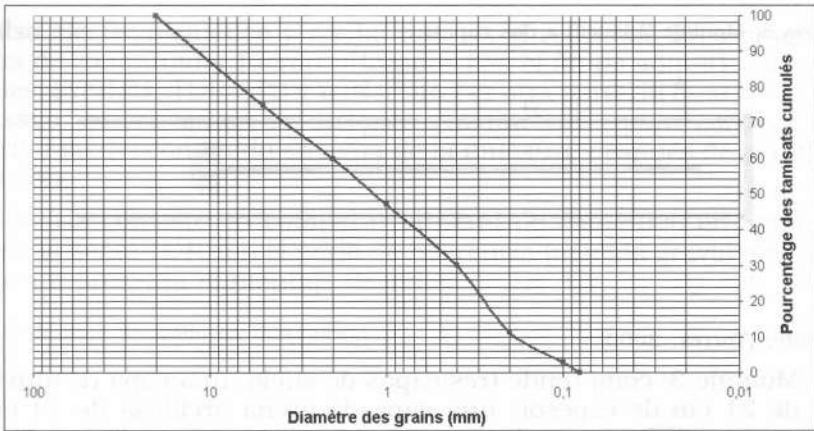
- d) Montajes 4, 5 y 6: estos montajes se realizaron con suelos naturales. Las características granulométricas de estos suelos son ilustradas en la figura 10 y en la tabla 1.

FIGURA 10. Curvas granulométricas para los suelos de los montajes 4 (a), 5 (b) y 6 (c).

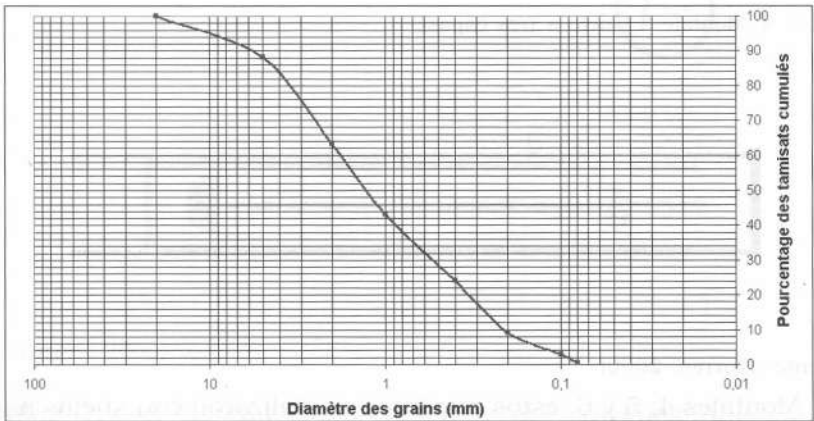


Fuente: [Torres, 2000]

b)



c)



Fuente: [Torres, 2000]

TABLA 1. Coeficientes de uniformidad,  $C_u$ , y de curvatura,  $C_c$ , para los suelos de los montajes 4, 5 y 6.

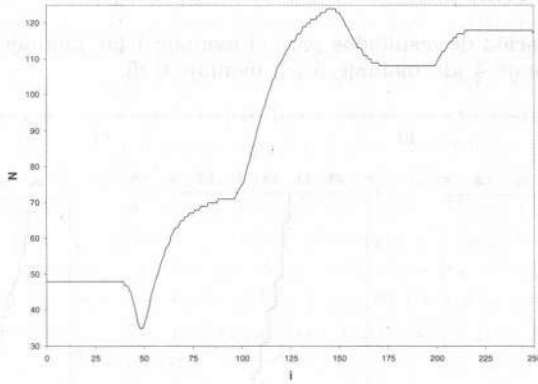
<b>Coficiente</b>	<b>Montaje 4</b>	<b>Montaje 5</b>	<b>Montaje 6</b>
Cu	17	9	11
Cc	0,2	0,9	0,4

Fuente: [Torres, 2000]

#### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La señal bruta reflejada de la sonda en el aire (circuito abierto), obtenida gracias al aparato TDR (Tektronix 1502B) y al programa de computador INFIL01, se muestra en la figura 11.

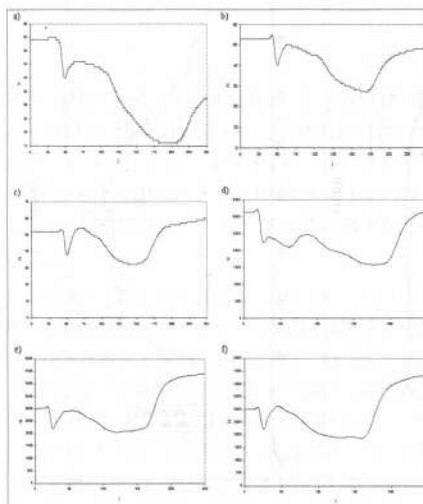
FIGURA 11. Señal característica de la sonda en el aire (INFIL01).



Fuente: [Torres, 2000]

Para los seis montajes se utilizó el método presentado en el numeral 2. La relación utilizada entre la permitividad,  $K$ , y el contenido de agua,  $\theta$ , es la relación de Topp et al. [1980] (ecuación 4). La muestra de suelo se dividió en partes de 2 a 3 cm de espesor. A cada parte se le realizó el ensayo gravimétrico como método de referencia para obtener el perfil de contenido de humedad real de la muestra. Las señales registradas por el aparato TDR con ayuda de los programas INFIL01, TDR-SPS y WIN-TDR justo antes de los desmontes se muestran en la figura 12.

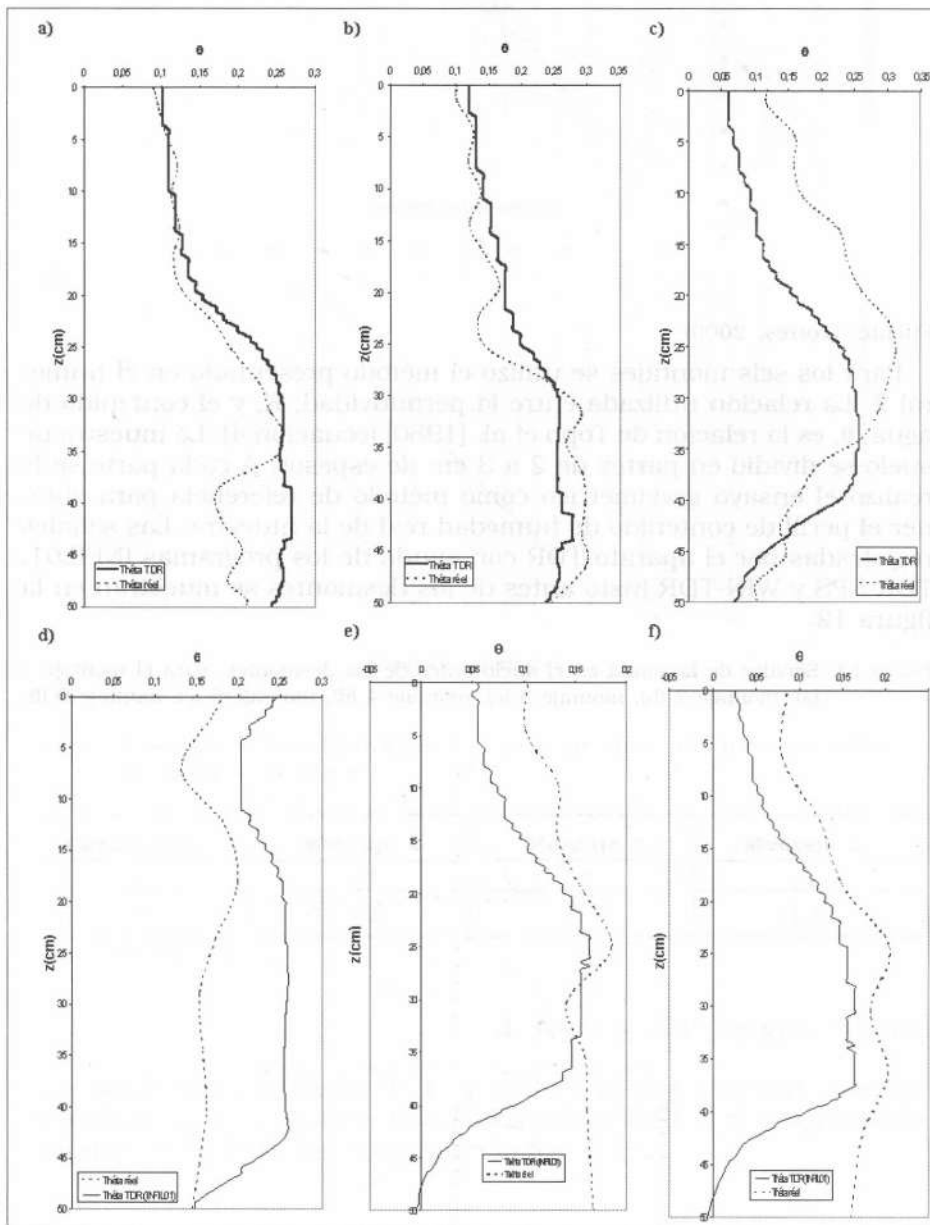
FIGURA 12. Señales de la sonda en el suelo antes de los desmontes, para el montaje 1 (a), montaje 2 (b), montaje 3 (c), montaje 4 (d), montaje 5 (e), montaje 6 (f).



Fuente: [Torres, 2000]

La figura 13 presenta los resultados obtenidos con el método TDR comparados con los resultados que arroja el método gravimétrico (contenido en agua real) para los diferentes montajes.

FIGURA 13. Comparación de resultados para el montaje 1 (a), montaje 2 (b), montaje 3 (c), montaje 4 (d), montaje 5 (e), montaje 6 (f).



Fuente: [Torres, 2000]

Para el montaje 1 (a), suelo a tres capas, se observa una diferencia de perfiles que se pronuncia aún más a partir de una distancia de 37 cm. Este punto corresponde a un cambio de la segunda (arena arcillosa) a la tercera capa de suelo (aluviones). Los contenidos medios de agua son de 18% para el método gravimétrico y de 22% para el método TDR, que equivale a un error medio de 21%. Para el montaje 2 (b), suelo a dos capas, se observa que los perfiles son bastante cercanos y tienen prácticamente la misma forma. Los contenidos medios de agua son del 20% para el método gravimétrico y de 22% para el método TDR, lo que corresponde a un error medio de 10%. Para el montaje 3 (c), suelo a tres capas, se observa una diferencia de perfiles bastante pronunciada; sin embargo, la forma de las curvas es semejante. Los contenidos medios de agua son de 21% para el método gravimétrico y de 18% para el método TDR, que equivale a un error medio de 15%. Para el montaje 4 (d), suelo natural, se observa que hay una diferencia muy marcada entre los perfiles; sin embargo, las curvas tienen formas bastante semejantes. Los contenidos medios de agua son de 16% para el método gravimétrico y de 24% para el método TDR (error medio de 50%). En el montaje 5 (e), suelo natural, se observa una diferencia entre los perfiles obtenidos a partir de los ensayos gravimétricos y aquellos obtenidos a partir del método TDR (INFIL01); ésta se pronuncia aún más a partir de una distancia de 35 cm. Los contenidos medios en agua son de 15% para el método gravimétrico y de 11% para el método TDR (error medio de 27%). Finalmente, en el montaje 6 (f), suelo natural, se observa que hay una diferencia entre los perfiles obtenidos a partir de los ensayos gravimétricos y aquellos obtenidos a partir del método TDR (INFIL01); ésta se pronuncia aún más a partir de una distancia de 39 cm. Los contenidos medios de agua son de 15% para el método gravimétrico y de 11% para el método TDR (error medio de 27%).

## 5. CONCLUSIONES

Al comparar los resultados obtenidos a partir de este método con aquellos obtenidos a partir del método gravimétrico se concluye que el método utilizado no da resultados fiables. Sin embargo, las formas de los perfiles de contenido de agua obtenidas a partir del método utilizado son semejantes a las formas de los perfiles reales -si bien los valores varían fuertemente-.

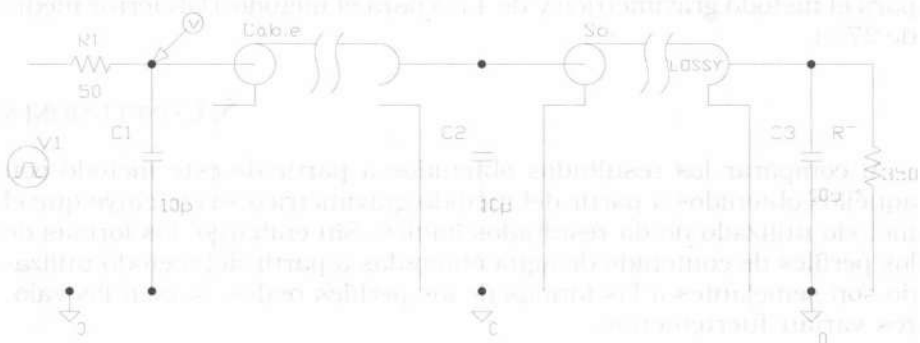
El problema de obtención de un perfil de cantidad de agua a través del método TDR no está resuelto. Nuevos enfoques están en vías de desarrollo. Uno de esos enfoques está basado en la simulación eléctrica a través del método SPICE (*Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis*), presentado brevemente en el anexo. Se espera entonces que nuevas investigaciones se adelanten para el desarrollo del método TDR con el fin de que éste sea aplicado en numerosas disciplinas.

## INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN ELÉCTRICA

Una solución para obtener el perfil del contenido de agua a partir de una sola sonda que arroje resultados fiables puede ser la simulación eléctrica. Esta consiste en modelar el sistema *Aparato TDR-Cable-Sonda-Suelo* como un circuito eléctrico, caracterizando el suelo por medio de una impedancia. Las características eléctricas del aparato TDR, del cable y de la sonda, son conocidas; por el contrario, las características eléctricas del suelo son desconocidas y varían según su naturaleza y su humedad. El objetivo de la simulación es obtener una señal reflejada ideal, a partir del circuito, y compararla con la señal reflejada real, obtenida a partir del aparato TDR con la ayuda de un programa como INFIL01, TDR-SPS o WIN-TDR. Mediante la variación de las características eléctricas del suelo en el montaje eléctrico, se puede llegar a tener una señal reflejada ideal que se aproxime bastante a la señal reflejada real. En esa instancia, bastaría aplicar las relaciones que ligán los valores eléctricos dados al suelo y su permitividad, para finalmente llegar al contenido de agua.

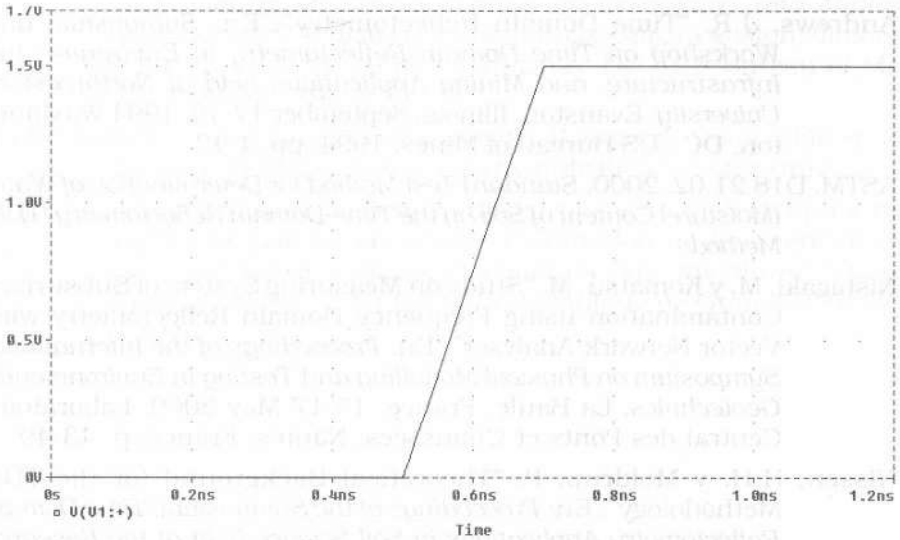
Con la colaboración de funcionarios del *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)* en Grenoble, Francia, se pudo obtener un ejemplo de simulación de una sonda TDR en un suelo. Para este ejemplo se utilizó el programa *MicroSim Pspice A/D* que se basa en el método *SPICE*. El circuito de la figura 14 representa el sistema *Aparato TDR-Cable-Sonda-Suelo*.

FIGURA 14. Circuito eléctrico de una sonda TDR en el suelo.



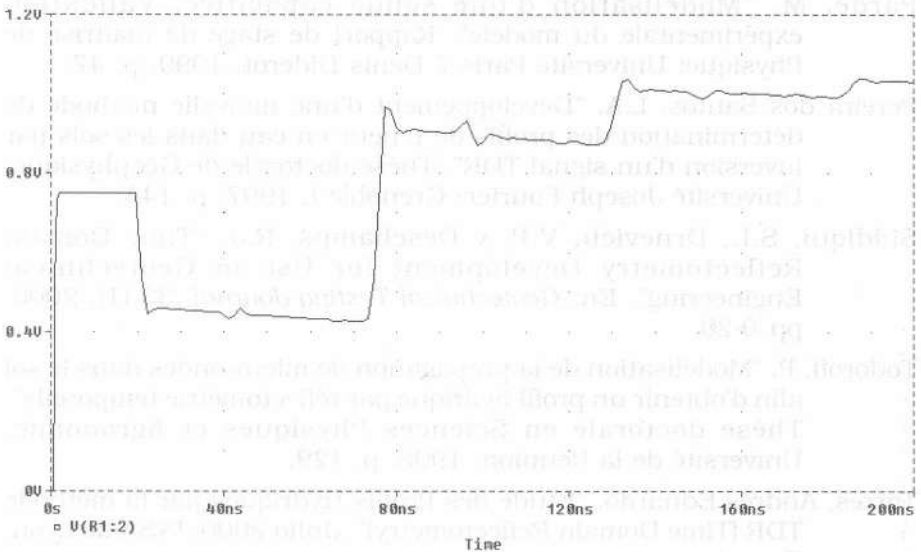
Sobre *MicroSim Waveform Analyzer (MicroSim Probe)* se puede ver la señal de entrada en función del tiempo, tal como se muestra en la figura 15.

FIGURA 15. Señal de entrada en función del tiempo dada por el programa *MicroSim Waveform Analyzer (MicroSim Probe)*.



La señal reflejada por la simulación realizada con el programa *MicroSim Waveform Analyzer (MicroSim Probe)* se muestra en la figura 16.

FIGURA 16. Señal reflejada en función del tiempo dada por el programa *MicroSim Waveform Analyzer (MicroSim Probe)*.



- Andrews, J.R. "Time Domain Reflectometry". En: *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications held at Northwestern University, Evanston, Illinois, September 17-19, 1994* Washington, DC : US Bureau of Mines, 1994, pp. 4-13.
- ASTM. D18.21.02, 2000. *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Time-Domain Reflectometry (TDR) Method*.
- Nishigaki, M. y Komatsu, M. "Study on Measuring System of Subsurface Contamination using Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyser". En: *Proceedings of the International Symposium on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*. La Baule, France. 15-17 May 2000. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France, p. 43-49.
- Nissen, H.H. y Moldrup, P. "Theoretical Background for the TDR Methodology". En: *Proceedings of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science held at the Research Centre Foulum, September 16, 1994* (Tjele, Denmark: Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994), pp 9-23.
- Nissen, H.H., Moldrup, y Kachanoski, R.G. "Time Domain Reflectometry Measurements of Solute Transport across a Soil Layer Boundary". En: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2000, pp. 62-74.
- Parde, M. "Modélisation d'une sonde capacitive; Validation expérimentale du modèle". Rapport de stage de maîtrise de Physique: Université Paris 7 Denis-Diderot, 1999, p. 47.
- Pereira dos Santos, L.A. "Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR". Thèse doctorale de Géophysique: Université Joseph Fourier- Grenoble I, 1997, p. 144.
- Siddiqui, S.I., Drnevich, V.P. y Deschamps, R.J. "Time Domain Reflectometry Development for Use in Geotechnical Engineering". En: *Geotechnical Testing Journal*, 33 (1), 2000, pp. 9-20.
- Todoroff, P. "Modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin d'obtenir un profil hydrique par réflectométrie temporelle". Thèse doctorale en Sciences Physiques et Agronomie: Université de la Réunion, 1998, p. 129.
- Torres, Andrés Eduardo. "Etude des Profils Hydriques par la méthode TDR (Time Domain Reflectometry)", Julio 2000: INSA de Lyon, Francia.
- Vogeler, I., Duwig, C., Clothier, B.E. y Green, S.R. "A Simple Approach to Determine Reactive Solute Transport Using Time Domain Reflectometry". En : *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2000, pp.12-18.



White, I., Zegelin, S.J., Topp, G.C. y Fish, A. "Effect of Bulk Electrical Conductivity on TDR Measurement of Water Content in Porous Media". En: *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications held at Northwestern University, Evanston, Illinois, September 17-19, 1994* Washington, DC : US Bureau of Mines, 1994, pp. 294-308.

WIN TDR'99. "Time Domain Reflectometry [On-line]". Disponible en la dirección <http://psb.usu.edu/wintdr99/whatistdr.html>.

Zakri, T. "Contribution à l'étude des propriétés diélectriques de matériaux poreux en vue de l'estimation de leur teneur en eau: modèles de mélange et résultats expérimentaux". Thèse doctorale: Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997, p. 194.